

# Analysis of policies contributing to sustainability of the global energy system using the Global Multi-regional MARKAL model (GMM)

**Doctoral Thesis****Author(s):**

Rafaj, Peter

**Publication date:**

2005

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005011078>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

**Analysis of Policies Contributing to Sustainability of  
the Global Energy System Using the Global Multi-regional  
MARKAL Model (GMM)**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by  
Peter Rafaj  
MSc., Comenius University Bratislava, Slovakia  
born September 25, 1972  
citizen of Slovak Republic

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Alexander Wokaun, examiner  
Prof. Dr. Konrad Hungerbühler, co-examiner  
Socrates Kypreos, co-examiner

Zürich 2005

## Abstract

A sustainable energy system can be characterized as a system wherein the production and use of energy resources support long-term social and economic human development while staying compatible with environmental balance. Strong indications exist today that continuation along the current energy-system development path, and the anticipated rate of change over the foreseeable future, are not compatible with key elements of sustainability.

This thesis assesses the impact of an illustrative portfolio of policy instruments that address different sustainability concerns for the global energy system in the areas of climate change, air pollution and introduction of renewable energy resources. The effects of a policy set implemented either individually or in combination were examined using the multi-regional, energy-system Global MARKAL Model (GMM), which is a "bottom-up" (technology-based) partial-equilibrium model that provides a detailed representation of energy technologies and endogenizes technology learning.

The policy instruments investigated include: a) cap-and-trade strategy imposing a CO<sub>2</sub> emission-reduction target on the global energy system; b) a subsidy scheme for promotion of renewable energy sources and a renewable portfolio standard that forces a minimum share of renewable electricity generation coupled with trading of green certificates; and c) the internalisation of external costs of power generation associated with air pollution and global warming. In addition, a set of combined-policy-scenarios was developed to analyse cross-policy interaction and potential synergies.

Implementation of flexible mechanisms in climate-response policies, that aims at stabilisation of energy-related CO<sub>2</sub> emission rates to a global level of 10 GtC/yr by the year 2050, results in significant reductions in the energy system cost and marginal costs of carbon abatement, as well as in an increasing diffusion of low-carbon technologies as compared to a mitigation regime without flexibility. The flexibility mechanisms refer to "where" and "when" flexibility in CO<sub>2</sub>-mitigation, thereby allowing for a cost-efficient distribution of the global carbon budget over the world regions and over time.

Consideration of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases enhances the flexibility in emissions abatement by identifying an optimal trade-off between offending gases. Multigas strategies involve "what" flexibility in the mitigation process and moderate further the overall policy-induced economic penalties.

A renewable-energy portfolio standard was chosen as a regulatory instrument that favours renewable power production. The resulting prices of green certificates traded globally across regions confirm the feasibility of significant increase in penetration of renewables over the present levels at an affordable cost. The forced 35% market share of renewables in the electricity mix, however, is also associated with considerable reductions in electricity demand. Application of a subsidy scheme that provides an incentive to renewable-power suppliers accelerates initially the market penetration of renewables but does not reinforce the continuous market gains beyond the periods of direct monetary support.

External costs adopted in the electricity sector are based on assumptions related to environmental and health damages under the European conditions, and were adjusted to other world regions. Internalisation of externalities into the price of electricity changes the competitiveness of supply options in favour of non-fossil generation systems, as well as favouring power plants with emission control. Structural changes and fuel switching in the electricity sector result in significant reductions of emissions of air-polluting substances as well as CO<sub>2</sub>.

Application of single or combined policy instruments changes substantially the structure and environmental performance of the electricity generation sector. The portfolio of technology options that emerges from the scenario analysis includes natural gas combined cycle, nuclear power plants, advanced coal systems with moderate SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> emissions rates and with CO<sub>2</sub>-capture. Within the set of renewable-energy systems, the most promising are wind turbines, hydropower and biomass plants.

The decarbonisation effect of exogenously imposed sustainable policies is accompanied by a significant reduction of local and transboundary air pollution. These secondary benefits attendant to this multiple emission abatement might offset the direct cost of policy implementation. These positive environmental and economic effects are amplified when a range of policy instruments are adopted simultaneously, which illustrates quantitatively the potential for synergies between three energy-policy domains investigated.

## Kurzfassung

Ein nachhaltiges Energiesystem lässt sich dadurch charakterisieren, dass Produktion und Verbrauch von Energieressourcen die zukünftige soziale und wirtschaftliche Entwicklung der Menschheit in umweltgerechter Weise fördern. Die Anzeichen deuten auf Basis heutigen Wissens deutlich darauf hin, dass eine Fortsetzung der gegenwärtigen Entwicklung des Energiesystems und die derzeit erwarteten Veränderungen mit den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung nicht im Einklang stehen.

Die vorliegende Arbeit schätzt in diesem Zusammenhang die Auswirkungen beispielhafter politischer Strategien auf verschiedene Aspekte der Nachhaltigkeit eines globalen Energiesystems ein, speziell in den Bereichen Klimawandel, Luftverschmutzung und Einführung erneuerbarer Energien. Zu diesem Zweck wurden die Auswirkungen einzelner Massnahmen oder von Massnahmenbündeln mit Hilfe des multi-regionalen Energiemodells ‚Global MARKAL Model‘ (GMM), ein „bottom-up“ partielles Gleichgewichtsmodell, das Energietechnologien detailliert abbildet und technologisches Lernen endogenisiert, untersucht.

Nachfolgende politische Strategien werden in dieser Arbeit behandelt: a) eine Beschränkung der CO<sub>2</sub>-Emissionsrechte des globalen Energiesystems mit internationalem Zertifikatehandel; b) Subventionen zur Förderung erneuerbarer Energien und das Festlegen von Mindestanteilen erneuerbarer Energien bei der Elektrizitätsproduktion zusammen mit dem Handel von grünen Energiezertifikaten; und c) die Internalisierung externer Kosten der Stromerzeugung im Zusammenhang mit Luftverschmutzung und globaler Erderwärmung. Zusätzlich wurden verschiedene Szenarien entwickelt, mit Hilfe derer das Zusammenwirken verschiedener Politikstrategien auf mögliche Interaktionen und potentielle Synergien untersucht wurde.

Die Einführung flexibler Klimaschutzstrategien, die die Stabilisierung energetisch bedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen auf einem Level von 10 GtC pro Jahr bis 2050 vorsehen, führt zu signifikanten Reduktionen der Energiesystemkosten und der marginalen Kosten der Verringerung von Kohlenstoffemissionen. Im Vergleich zu Instrumenten, die keine Flexibilität zulassen, fördern flexible Instrumente gleichzeitig den Einsatz von kohlenstoffarmen Technologien. Die Kosten einer solchen Klimaschutzstrategie lassen sich beträchtlich mindern, wenn bei der Implementierung der Politikinstrumente die Flexibilität hinsichtlich des Zeitpunkts und des Ortes der Emissionreduktion optimal genutzt werden.

Wenn die CO<sub>2</sub> bezogene Klimaschutzstrategie durch die kompensierende Minderung anderer Treibhausgase als weiteres flexibles Politikinstrument zugelassen wird, können die gesamten Vermeidungskosten zusätzlich gesenkt werden.

Das Festlegen von Mindestanteilen erneuerbarer Energien wurde als Regelinstrument zur Förderung der Elektrizitätsproduktion aus erneuerbaren Energien gewählt. Die daraus resultierenden Preise global gehandelter grüner Energiezertifikate zeigen, dass ein signifikanter Anstieg des Marktanteils erneuerbarer Energien über heutige Anteile zu moderaten Kosten erreichbar ist. Dennoch führt das Ziel eines Anteils erneuerbarer Energien von 35% an der Stromerzeugung zu deutlichen Rückgängen in der Elektrizitätsnachfrage. Die alternative Einführung von Subventionen stellt eine Art finanzielle Starthilfe dar, die zwar anfänglich zu einem vermehrten Einsatz der Erneuerbaren führt, aber nicht ausreicht, um sie auf Dauer gegen die konventionellen Energietechnologien durchzusetzen.

Die hier verwendeten externen Kosten der Stromerzeugung beziehen sich auf Annahmen für lokale Umwelt- und Gesundheitsschäden unter Europäischen Bedingungen, und wurden für andere Regionen der Welt angepasst. Die Internalisierung von Externalitäten im Elektrizitätspreis verschiebt die Wettbewerbsfähigkeit bei der Stromerzeugung zugunsten nicht-fossiler Systeme und Anlagen mit Emissionskontrolle. Strukturelle Veränderungen und der Wechsel des Brennstoffs im Elektrizitätssektor führen zu einer erheblichen Reduktion der Emissionen luftverunreinigender Substanzen und CO<sub>2</sub>.

Die Frage der Anwendung einzelner Massnahmen oder ganzer Massnahmenbündel hat deutliche Auswirkungen auf die Struktur der Elektrizitätsproduktion und seiner Umweltauswirkungen. Die vorliegende Szenarienanalyse legt nahe, dass aus Sicht der Nachhaltigkeit Technologien wie GuD-Kraftwerke, Kernkraftwerke sowie fortschrittliche Kohlekraftwerke mit geringen SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Emissionen und CO<sub>2</sub>-Rueckhaltung erfolgversprechend sind. Bei den erneuerbaren Energietechnologien erscheinen Windkraft-, Wasserkraft- und Biomasseanlagen als aussichtsreich.

Die Senkung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eine nachhaltige Umgestaltung des Energiesystems geht einher mit einer signifikanten Reduktion lokaler und grenzüberschreitender Luftverschmutzung. Solche Nebeneffekte einer nachhaltigen Politikstrategie können die direkten Kosten der Massnahme aufwiegen. Die positiven Umwelt- und Kosteneffekte ergänzen und vergrössern sich, wenn verschiedene Massnahmen simultan eingesetzt werden, was das Potential für Synergien zwischen drei energiepolitischen Strategien deutlich macht.